

토양 활용 기후 관리

신 현 길

연세대학교 생명공학과
E-mail: shkdidrlf@gmail.com

요약문

토양은 육지에 사는 모든 생태계의 기능 및 음식과 섬유소 생산에 필수적이다. 토양에 대해서 간과하고 있는 부분 중에 하나는 토양이 온실 가스 배출을 완화시킬 수 있다는 것이다. 토양 기반 온실 가스 배출 완화 활동의 구축은 초기단계에 있으며, 온실 가스 배출 및 감소를 정확하게 정량화하는 것은 아직까지 어려움으로 남아있다. 신흥 연구 및 정보 기술의 발전을 통해 온실 가스 정책 내에 토양의 역할이 포함될 수 있는 토대가 제공되었다. 여기서는 토양 온실 가스에 대한 최신 연구를 소개, 완화 효과 및 가능성에 대한 요약, 실제 데이터와 이론간의 격차, 그리고 이러한 차이를 해소하기 위해 필요한 연구, 기술, 협업에 대해서 제안하고 있다.

Key Words: Climate change

본 자료는 Climate-smart soils, *Nature*, 532 (7597), pp. 49-57.의 논문을 한글로 번역, 요약한 자료입니다.

목 차

1. 소개
2. 프로세스 컨트롤 및 완화 작용
 - 2.1 관리 개선을 통한 토양 활용 탄소 제거
 - 2.2 외부 탄소 유입을 통한 토양 활용 탄소 제거
 - 2.3 N₂O 배출 감소를 위한 토양 관리
 - 2.4 CH₄ 배출 감소를 위한 토양 관리
3. 토양 GHG 완화의 잠재성
4. 완화 작용 구현
5. 불확실성 정량화

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

6. 결론 및 제안

1. 소개

농업은 사람에 의해 온실 가스(greenhouse gases, GHGs)가 증가한 최초의 사례로 알려져 있다. 농업 및 농업과 연관된 토지 사용으로 인한 변화는 세가지 주요한 GHG(이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O))의 소스로 남아있다. 토지 활용은 전세계 인위생성된 GHG 방출의 25% 이상 기여하는데, 10~14%는 직접적인 농업 생산 때문이고 다른 12~17%는 삼림 파괴와 같은 토지 피복 변화에 해당한다. 그래서 토지 관리를 개선시킴으로써 상당한 양의 가스 방출을 줄일 수 있고, 식물들을 통해 대기중의 CO₂를 일부 제거할 수 있다. GHG 방출 감소와 탄소 감소 외에도 현명한 토지 관리를 통해 유기물을 증가시키고 토양 질소 순환을 증가시키면 토지의 비옥화, 토지 생산성 증대, 토지 생물 다양성 증가, 토지 침식 감소, 수질 오염 감소와 같은 시너지 효과를 얻을 수 있다.

GHG 상쇄시장 내 토지 중심 완화 프로젝트 및 저탄소 제품 시장이 시작됨에 따라 농업 GHG 완화 작용의 역할도 증가할 것으로 보인다. 더욱이, 최근 상당량의 탄소를 토지에 저장해야 GHG 배출의 안정화를 달성할 수 있음이 분석을 통해 확인됨에 따라 토양에 탄소를 축적시켜 탄소를 제거하는 전략에 대한 관심이 증가하고 있다. 토양을 활용한 탄소 제거는 저가로 광범위하게 적용될 수 있는 몇 가지 전략 중 하나이다. 프랑스 정부의 경우 농지의 탄소 농도를 매년 0.4%씩 증가시키는 방법이 제안되었다. 이러한 방법은 매년 1.2 petagram (Pg)의 탄소 비축량을 증가시킬 것으로 예상된다.

수십 년간의 연구 결과를 통해 토지 용도 및 관리 방법에 대한 개선을 통해 토지 GHG 방출을 감소시키고 토지 탄소 비축량을 증가시킬 수 있음이 입증되었다. 그러나 실제로 효과적인 토지 기반 GHG 완화 정책을 광범위하게 구현하기 위해서는 GHG 감소에 대한 효과와 불확실성을 정량적으로 정확하게 측정할 수 있어야 한다. 빅데이터 접근법을 통해 토지 사용, 토지 관리, 관련 기술에 대한 내용들을 종합함으로써 GHG 완화의 잠재성에 대해서 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 프로세스 컨트롤 및 완화 작용

2.1 관리 개선을 통한 토양 활용 탄소 제거

흙은 지상에서 가장 많은 유기 탄소를 보유하고 있다(1m 깊이에 ~1500 PgC, 2m 깊이에 2400 PgC). 이는 현재 대기에 있는 CO₂ 양의 3배에 해당하며, 현재 매년 화석 연료 배출(~10 Pg)의 240배에 해당된다. 그렇기 때문에 흙의 탄소 저장량을 몇 퍼센트라도 증가시키면 상당한 양의 탄소를 감소시킬 수 있다.

토양에서의 탄소 균형을 조절 속도는 식물 잔여물, 거름 혹은 다른 유기 폐기물에 의한 탄소의 축적 속도에서 분해에 의한 탄소 손실 속도를 뺀 값으로 결정된다. 그런 이유에서 탄소 비축량은 유기 물질의 유입 증가 및 분해율 감소에 의해서 증가되며, 두 경우 대기에서의 전체 탄소 제거량으로 이어질 수 있다. 그러나 토양 탄소 증가 율은 비축된 양이 새로운 평형이 도달할 때마다

감소 된다. 그러므로 전체 이산화탄소 제거는 제한된 기간 동안 발생하며 20~30년 동안 지연되기도 한다.

야생 숲과 초원은 지하의 바이오매스 생산의 상당한 부분을 차지하고 있고, 이러한 지역의 토양은 상대적으로 사람의 손길이 닿지 않은 채 그대로 남아있다. 그렇기 때문에 이러한 곳의 고유한 생태계는 농경지에 비해 흙이 더 높은 탄소를 보유하도록 보조하는 역할을 하고 있다. 토지가 농경지로 전환됨에 따라 일어나는 흙의 탄소 손실(0.5~2 Megagram (Mg) 이상의 탄소(C)/헥타르(ha)/년(yr))은 광범위하게 논문에서 발표되어 있다. 토양이 새로운 평형에 도달함에 따라 발생하는 총 손실량은 대략 표층(0-30cm 깊이) 탄소 비축량의 30%~50%에 해당된다. 그렇기 때문에 고유한 생태계의 전환을 피하는 것은 강력한 완화 방법 중 하나에 해당된다. 역으로, 수익이 안나는 농지 혹은 척박해진 토지를 오랫동안 지속될 수 있는 숲 혹은 초지로 회복시키는 것은 흙의 탄소 저장량을 늘릴 수 있는 방법이다(그림 1). 농업용으로 활용하기 위해 물을 빼낸 습지를 회복시키는 것은 지속되는 탄소 손실을 막을 수 있다.

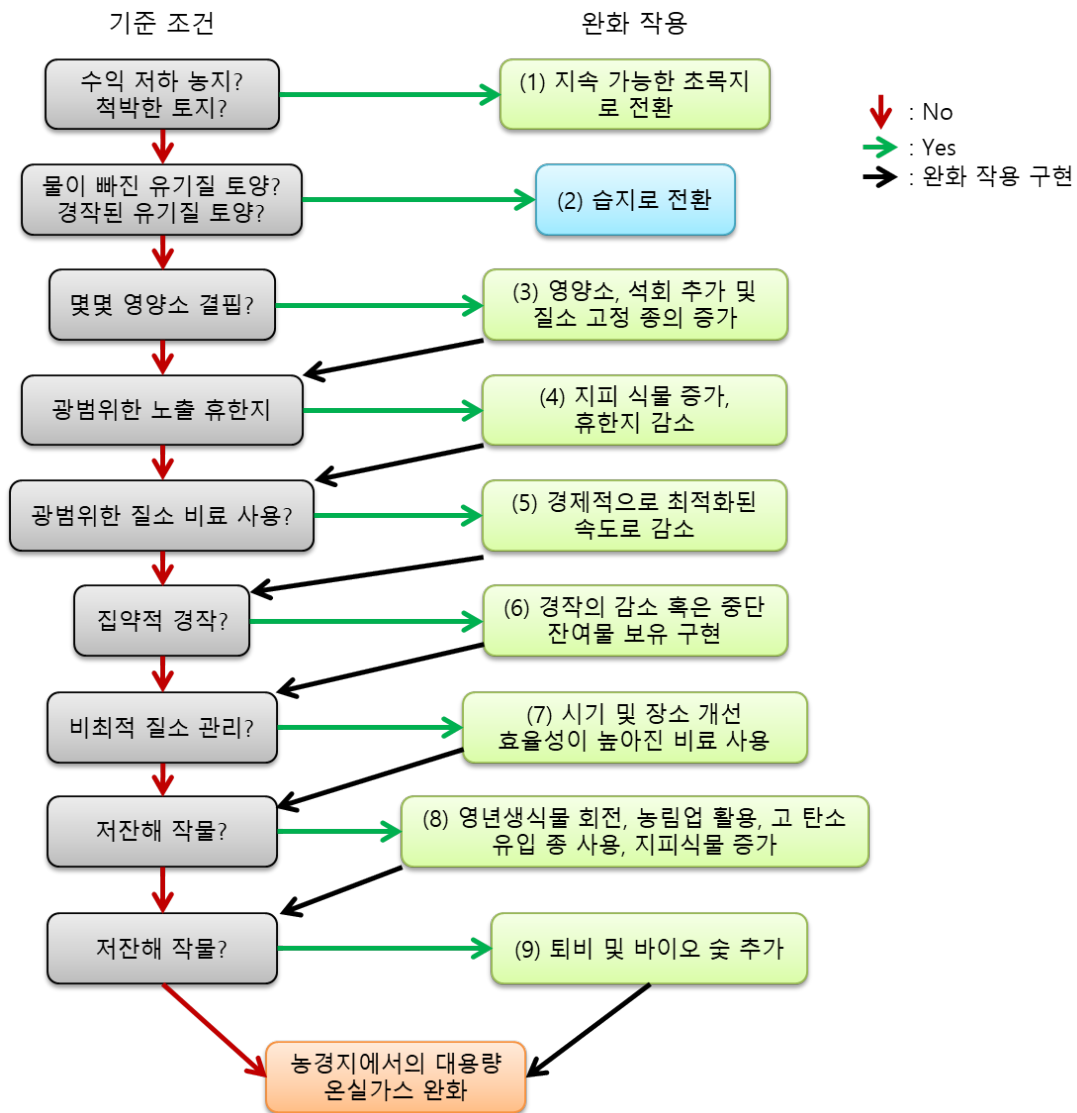


그림 1. 경지 GHG 완화 작용 의사 결정 트리

일반적으로 농업용으로 활용된 토지에서의 토양 활용 탄소 제거 속도는 초지나 숲으로 회복된 땅에 비해 더 낮고, 토지 활용 이력, 토양 혹은 기후 조건, 토지에 적용된 관리 방법들의 조건에 따라 0.1~1 MgC/ha/yr 정도 차이가 발생한다. 토양의 탄소 유입을 증가시키는 방법으로는 1) 토양의 회전율이 낮은 더 깊은 층에 탄소를 비축시킬 수 있는 종들을 증가시키거나, 2) 탄소 유입량을 증가시키는 농작물로 윤작을 하거나, 3) 잔여 농작물을 좀 더 오래 보유해두거나, 4) 휴지 기간 동안 지피작물을 통해 탄소를 유입시키는 방법이 있다(그림 1). 지피작물은 질산염을 포함한 영양 손실 또한 감소시킬 수 있다. 질산염은 보통 물가에 있는 경우 N_2O 로 전환되어 버린다.

탄소 유입 증가를 위한 다른 방법으로는 물이 제한된 곳에서의 관개하는 방법과 영양소 결핍으로 소출이 낮은 곳에서 생산성을 증가시키기 위해 비료를 추가하는 방법이 있다(그림 1). 비록 소출을 증가시키기 위한 추가적인 영양소와 물의 유입이 CO_2 없는 배출을 증가시킬 수 있지만, 땅에서의 방출 강도(GHG 방출/단위 소출)는 감소할 수 있다.

2.2 외부 탄소 유입을 통한 토양 활용 탄소 제거

퇴비와 바이오 숯과 같은 외부 자원으로부터 식물로부터 유래된 탄소를 추가함으로써 토지 탄소 비축량을 증가시킬 수 있고, 이를 통해 대기로부터 전체적인 CO_2 를 제거할 수 있다. 퇴비와 바이오 숯은 식물 잔여물에 비해 더 천천히 분해되는데, 이는 퇴비의 체류 시간이 퇴비를 주지 않은 유기물보다 체류 시간이 몇 배 길기 때문이고 바이오 숯의 경우 숯이 되지 않은 바이오매스보다 10-100배 천천히 광석화가 되기 때문이다. 이러한 이유에서 바이오 숯과 같은 방대한 양의 탄소가 토지 내에 추가되게 되면 수십 년 혹은 그 이상 동안 지속될 수 있다. 그러나 체류 시간은 영양소 성분, 토지 조건, 습도, 온도 및 질감에 따라 다를 수 있다.

2.3 N_2O 배출 감소를 위한 토양 관리

곡식을 경작하는 토양은 다른 인위적 배출원에 비해 N_2O 를 더 많이 대기로 배출한다. 가스 방출을 줄이기 위해 질소 관리를 개선시키는 것은 토지 및 지표수의 질산염 오염과 같은 환경적 문제를 완화시킬 수 있다(표 1). 토지 내 미생물의 활동에 의한 질화 작용 및 탈질소 작용에 의해서 N_2O 가 생산이 된다. 질화 과정이 일어날 때 비료로부터 추가된 암모늄, 콩과 식물에 의해 대기로부터 고정된 암모늄, 토지 유기물, 작물 잔여물 혹은 다른 유입에 의해 광물화된 암모늄이 아질산염으로 산화되고 계속되는 화학 반응을 통해 최종적으로 질산염이 되면서 N_2O 가 생산되게 된다. 마찬가지로 토양 산소 농도가 낮을 때 탈질소기가 질산염을 전자 수용체로 사용함으로써 N_2O 가 부산물로 생성이 되어 대기 중으로 빠져나가게 된다.

2.4 CH_4 배출 감소를 위한 토양 관리

전세계 1/3 이상의 메탄 방출(200 teragram (Tg)/yr 이상)은 무산소성 토지 조건에서 미생물의 유기 화합물 분해에 의해서 일어난다. 습지(177-284 Tg/yr)와 논농사(33-40 Tg/yr)는 세계적으로 가장

넓은 메탄 출처로 알려져 있다. 반면에 통기가 잘 된 토양은 대기중 메탄의 산화를 통해 메탄 저장소(~30 Tg/yr)와 같은 역할을 할 수 있다. 토양 메탄 유입의 핵심적인 결정 요인은 공기 유입, 기질 이용 가능성, 온도 및 질소 투입을 포함한다. 그렇기 때문에 토양 관리를 통해 근본적인 메탄 유입을 바꿀 수 있다. 예를 들어, 토지를 농지로 전환시키는 경우 질소 순환의 가속화에 의한 메탄영양세균의 억제에 의해서 메탄의 산화를 심각하게 제한하게 된다.

3. 토양 GHG 완화의 잠재성

GHG 완화 전략으로써 토지 용도 및 관리 정책을 적용하기 위해서는 기술적으로 가능한지의 여부와 현재 경제적 사회적 정책적 제한 내에서 성취 가능한 것이 무엇인지 정확하게 파악해야 한다. 종합적 농업 용지 관리 분석을 위해서는 가스 배출 감소 및 토지 활용 탄소 제거에 대한 기후 계층 모델과 경제적 토지 사용 변화 모델을 결합시켜서 탄소 가격(완화를 위해 지불되어야 하는 사회적 인센티브)의 조절에 따른 완화 잠재성을 추정해야 한다. 가장 낮은 탄소 가격(20 USD/Mg of CO₂)을 가정했을 때 전체 토양 GHG 완화 가능성은 1.5~5.3 PgCO₂/yr로 추정된다. 주요 완화 정책이 적용되는 경우 평균적으로 1 MgCO₂/ha/yr 감소가 될 것으로 보이기 때문에 대규모 GHG를 감소시키기 위해서는 상당한 양의 농지 전환이 요구된다.

기존 방법과는 다른 완화 방법으로 뿌리계가 크고 깊은 작물을 개발하는 방법이 제안되고 있는데 이는 뿌리가 크고 깊을수록 식물 탄소 유입과 토양 탄소 비축량을 증가시키기 때문이다. 대부분의 작물이 유전자 변형을 통해 뿌리 특성을 상당히 바꿀 수 있음에도 불구하고 뿌리 생물량을 증가시키고 토지 내에 더 많은 탄소를 저장할 수 있는 뿌리 구조를 선택하는 것은 이전에는 작물 육종자들이 고려하지 않았던 방법이다. 토지 산성화, 저산소 환경, 영양소 제한에 대해 적응력을 가진 뿌리를 선택함으로써 뿌리 탄소 유입을 증가시킬 수 있을 뿐 아니라 작물 소출도 증가시킬 수 있다. 다년생초에 의해 유지된 토지 탄소 비축량은 한해살이 작물에 비해 훨씬 높는데 이는 뿌리 탄소 유입의 증가에 의한 효과로 알려져 있다.

4. 완화 작용 구현

다른 여러 가지 GHG 소스 카테고리에 비해 농지 GHG 완화에는 특이적인 어려움이 있는데, 개인별로 소유하고 있는 토지 구획의 크기가 작고, 광범위한 토지가 농업에 이용되고 있으며 토지를 사용하고 있는 사람들의 수가 수십억에 달한다는 것이다. 게다가 토지마다 특성이 다르고 토지마다 관리되고 있는 방식이 다양하기 때문에 농지 GHG 배출을 정량화 하는 것에는 상당한 어려움이 따른다. 직접적인 측정에는 전문가 집단과 전문 기구들이 필요하기 때문에 일반적인 연구 환경에서는 제공이 불가능하다. 모델 기반 방법에서는 가스 방출률이 지역, 환경 조건, 관리 방법에 따라 정량화 되는데 이런 접근법이 훨씬 더 현실성이 높은 방법이다. 프로세스 기반 모델은 동력학적으로 메커니즘을 시뮬레이션 하는 방법으로 기후 및 토양 변수, 관리 기법이 변수로 사용되며, 현장에서 계량된 유입율에 대한 통계 분석을 기반으로 하는 경험적 모델은 보완적 접근법으로 활용된다. 일반적으로 모델 기반 정량화 시스템은 실제 적용 결과를 모니터링할 수 있게

해주며 완화 정책 구현에 소요되는 비용을 극단적으로 감소시킬 수 있다.

GHG 완화 방법을 채택하도록 장려함으로써 토지 GHG 완화 전략을 구현할 수 있다. 가능한 장려책은 다음과 같다. 1) 질소 비료에 대한 과세를 통해 N₂O 방출 감소, 2) GHG 감소 정책 구현을 하는 대상자에게 보조금을 지원, 3) 곡물 공급 과정에서 주요 농작물 유통 업자가 낮은 GHG를 생산한 농산품 위주로 취급하도록 유통 농산품에 대한 기준 수립, 4) 탄소 배출권 거래제 적용. 완화 방법을 적용하기 위해서는 정확한 정량화 및 모니터링 기술이 요구된다. 가장 엄격한 방법이 요구되는 분야는 탄소 배출권 거래제 시장인데, 이는 토지 관리자가 가스 배출을 줄임으로써 직접적으로 보상을 받을 수 있기 때문이다. 농작물에 대한 그린 라벨과 같은 시장 연관 전략들 또한 엄격하면서도 사용하기 쉬운 GHG 정량화 도구를 필요로 한다.

토지 전환을 막음으로써 토양으로부터 상당한 양의 CO₂ 방출을 피하는 방법에 대해서 프로젝트가 진행 중인데 토지가 복잡하게 이용되는 경우에는 경험적인 모델이 적합하지 않은 것으로 확인이 되고 있다. 기존 농지에서 GHG 방출을 완화하는 방법으로는 토양 관리를 통해 N₂O, CH₄ 감소가 발생하는지 확인하는 프로젝트가 진행 중인데, 이 경우 제거되는 탄소의 양을 정량적으로 정확하게 파악하는 것이 어려움으로 남아있다. 그렇기 때문에 더 복잡한 모델과 보충 연구가 필요한 실정이다(그림 2).

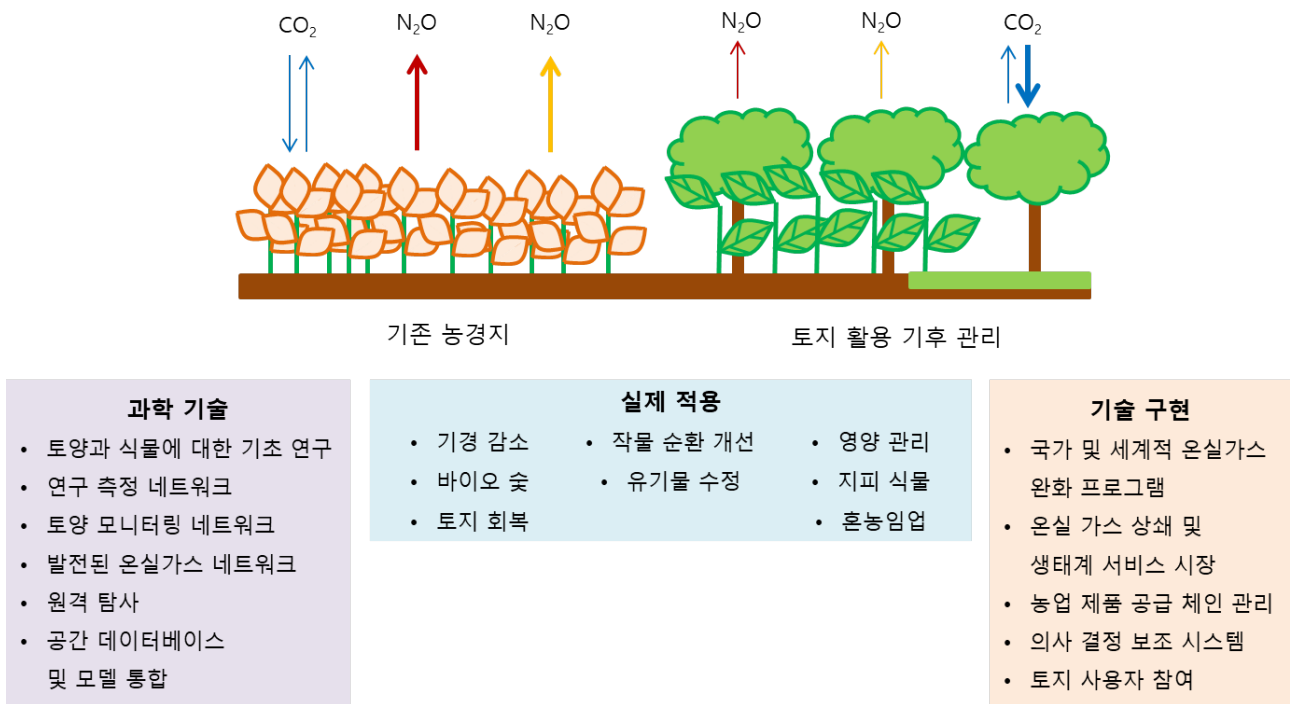


그림 2. 농지의 GHG 완화 역할 확장에 필요한 융합 연구 지원 및 구현 플랫폼

5. 불확실성 정량화

반응 과정에 대한 이해 부족, 부적절한 변수, 모델 입력 값(예: 날씨, 관리 방법, 토양 데이터)의 제한성 때문에 프로세스 기반 모델을 이용한 토양 탄소 비축량 변화 및 전체 GHG 유동 예측은 항상 불확실성을 갖고 있다. 경험적 모델은 일반적으로 측정된 데이터의 통계적 분석에 의존하고 있다. 그래서, 측정된 값들이 시스템의 조건을 충분히 반영하지 못하는 경우 모델이 편향성을 나타낼 수 있다. 비록 반응 과정에 대한 이해가 부족하더라도, 프로세스 기반 모델이 기후 스마트 농업 프로그램에서 토양 탄소 비축량과 GHG 유동 변화량을 추정하는데 가장 정확한 결과를 제공하고 있다. 프로세스 기반 모델을 통해 탄소 비축량과 GHG 가스 배출량을 추정의 불확실성은 개인별 보고하는 데이터간 차이에 의해 발생할 수 있다. 그렇기 때문에 많은 농장을 하나로 묶어서 데이터가 보고되면 불확실성을 줄일 수 있고 불확실성을 관리할 수 있는 실행 가능한 접근법이 될 수 있다.

6. 결론 및 제안

기후 변화와 GHG 완화를 실제 적용하기 위해서는 실현 가능하면서도 비용 대비 효과적인 방법이 사용되어야 하며 동시에 환경 친화적이어야 한다. 토양에 다양한 관리 기법 및 기술들이 적용됨으로써 가스 방출을 줄이고 대기중 탄소를 줄일 수 있음이 확인되었는데, 대부분의 방법들은 환경적으로 추가적인 이점을 줄 수 있다. 현재 농지 GHG 완화 전략 구현이 지연되고 있는 주요한 이유는 비용 효율적인 방법을 이용한 토양 완화 활동의 정량화 및 입증에 대한 실현 가능성 문제 때문이다. 이러한 문제점을 극복하면 얻을 수 있는 이점으로는 1) 토양 관리 수용에 대한 증가, 2) 정부의 환경 기반 보조금 지불 비용 감소, 3) 소비자들의 저탄소 제품에 대한 요구 충족을 들 수 있다.

불확실성을 관리하는 것이 예측 모델을 개선, 의사 결정 보조 도구를 개선, 토양 기반 GHG 완화를 증진시킬 수 있는 효과적인 정책 설계에 있어 핵심이라고 할 수 있는데, 이러한 노력들을 발전시키기 위해서는 몇몇 연구 및 개발들이 필요한 것이 사실이다(그림 3). 첫째로 다양한 관리 방법에 의한 토양에서의 기체 변화(N_2O , CH_4) 및 토양 탄소 측정값 및 농장에서의 토양 탄소 모니터링 네트워크에 대한 연구 지원이 강화되어야 한다. 이러한 지원은 기초 연구(예: 토양 유기물 안정화 과정, N_2O 와 CH_4 미생물학, 식물-미생물 상호작용, 식물 육종법 및 뿌리 표현형)와 함께 편성되어야 반응에 대한 이해, 새로운 완화 방법의 개발, 토양-기후 관리 시스템 개선을 이룰 수 있다. 일관된 측정 프로토콜로부터 생성된 고품질 데이터는 모델을 평가하고 개선하는데 반드시 필요한데, 새로운 센서 기술의 개발을 통해 이러한 부분에서 도움을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 단일 모델이 모든 경우에 적합할 수 없기 때문에 다양한 모델들이 개발되어 서로 간의 경쟁을 통해 발전하는 것이 필요한데, 광범위해진 협업과 개발자 간의 상호 모델 검증을 통해 모델 개발 또한 개선될 것으로 기대된다. 토양의 생물리학적 성질 및 기후 변화에 대한 방대한 지리정보학적 데이터베이스는 지형에 따른 토양 반응들을 정확하게 정량화 하는데 대단히 중요할 것으로 보인다(그림 2).

마지막으로, 전세계적인 토양 관리를 통한 기후 변화 완화 가능성을 이해하기 위해서는 문화적, 정치적, 사회 경제학적 문맥에 대한 이해를 필요로 하며, 이러한 이해를 바탕으로 하고 있을 때 성공적으로 관리 방법들이 적용될 수 있다. 특히 토지 사용자들이 결국 실제 GHG 완화 방법들을 적용해야 하는 사람들이기 때문에 이들의 광범위한 참여가 요구된다. 이를 위해 교육, 원조활동도 이루어져야 하며, 농업과 GHG 간의 상관관계에 대해서 새로운 전략을 통해 강조함으로써 이해 관계자들의 참여를 증진시키고 그들이 가지고 있는 그 지역 특이적인 정보를 활용해서 어떻게 방법들을 개선해야 할지 지속적인 고민이 필요하다(그림 2). 이런 것들이 조화롭게 작용할 때 기후 스마트 토양 관리를 위한 새로운 패러다임을 만들어 나갈 수 있을 것이다.

The views and opinions expressed by its writers do not necessarily reflect those of the Biological Research Information Center.

신현길(2017). 토양 활용 기후 관리. BRIC View 2017-R37

Available from <http://www.ibric.org/myboard/read.php?Board=report&id=2871> (Dec 07, 2017)

Email: member@ibric.org

※ 본 콘텐츠는 **invitrogen** **applied biosystems** 의 후원으로 작성되었습니다.